

管网剩余能力不足的输气路径优化研究

周 军¹ 张戴新¹ 赵云翔¹ 梁光川¹ 邵传辉²

1. 西南石油大学石油与天然气工程学院, 四川 成都 610500;
2. 浙江浙能天然气运行有限公司, 浙江 杭州 310013

摘 要:天然气长输管网构成了多环状结构的输气路径,管网公司将上游托运商的天然气运输到下游用户的路径有多种方式可供选择,从而对管网公司的利润产生较大的影响。针对管网中剩余能力不能满足托运商输送要求的问题,以管网公司利润最大为目标构建管输路径优化模型。考虑压气站、管道、节点平衡等约束条件,引入初始流量分配法对各条输气路径进行流量分配,通过优化算法对管网压力进行优化,得到管网公司在管网剩余能力不足下的托运方案。采用数学建模系统 MATLAB 调用遗传算法进行优化求解,算例验证了模型的准确性。优化结果表明,将管道剩余能力分配给管输平均运价率高的输气路径,可以增加管网公司收益,对提高运输商管输效益具有指导意义。

关键词:天然气管输;路径优化;管输收益;遗传算法

DOI:10.3969/j.issn.1006-5539.2022.05.001

Research on gas transmission path optimization of pipeline network with insufficient residual capacity

ZHOU Jun¹, ZHANG Daixin¹, ZHAO Yunxiang¹, LIANG Guangchuan¹, SHAO Chuanhui²

1. Petroleum Engineering School, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan, 610500, China;
2. Zhejiang Zheneng Natural Gas Operation Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310013, China

Abstract: The long-distance natural gas pipeline network constitutes a gas transmission path with multi-ring structure. There are many ways for pipeline companies to choose the path of natural gas consignment from upstream suppliers to downstream users, which has a great impact on the profits of pipeline network companies. Aiming at the issue that the residual capacity of the pipeline network fails to meet the transmission requirements of the supplier, the pipeline transmission path optimization model is developed with the goal of maximizing the profit of the pipeline network companies. Considering the constraints such as pressure station, pipeline and node balance, the initial flow distribution method is introduced to allocate the flow of each gas transmission path. The pipeline pressure is optimized by the optimization algorithm, and the gas distribution scheme of the pipeline network company under insufficient residual capacity of the pipeline network is obtained. The mathematical modeling system MATLAB is used to call up the genetic algorithm for optimization, and the accuracy of the model is verified by a case study. The optimization results show that allocating the pipeline residual capacity to the gas transmission path with a high average transportation price can improve the income of pipeline companies, which is of guiding

收稿日期:2022-05-31

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金资助项目“离散/网络空间中油气管网设计优化方法和体系结构研究”(51704253)

作者简介:周 军(1987-),男,四川德阳人,副教授,博士,研究方向为油气储运系统和综合能源系统优化工作。E-mail:zhoujunswpu@163.com

significance to improve the pipeline transmission profit margin of pipeline network operators.

Keywords: Natural gas pipeline transmission; Path optimization; Pipeline transmission profit margin; Genetic algorithm

0 前言

随着天然气管道互联互通的建成,天然气长输干线管网出现了多环状结构的输气路径。越来越多托运商的天然气接入到天然气管网中,现有的管道在没有扩建的条件下,管网的剩余能力不能满足所有上游市场的代输需求。因此,管网公司需要决策代输每家托运商的天然气量、分配到每条输气路径中的流量和沿线压气站的压力,以提高管网公司的经济效益。

在路径优化方面^[1-5],一些学者进行了研究,朱金峰^[6]研究了常规时间窗下的车辆路径优化问题,构建了冷链物流成本数学模型。Kovacs A A 等人^[7]通过权衡服务质量目标和成本目标,分析得到了多周期下路径随运输量的变化关系。曾叶丽等人^[8]以供应链理论为基础构建了天然气市场优化模型,求解了天然气市场中生产、运输、贮藏、营销和消费问题。Chiang W C 等人^[9]研究了丙烷气体供应链网络中的集成采购和配送路由规划问题。单保华等人^[10]构建了 LNG 罐箱运输路径优化模型,并基于遗传算法进行优化求解。崔岩等人^[11]分析了不确定环境下的供应商的配送问题,构建了配送路径优化模型。

在管网优化求解算法方面^[12-16], Ghiami Y 等人^[17]结合了混合整数规划公式和自适应大邻域搜索算法的数学方法,解决了将 LNG 从存储设施向多个加注站配送的库存路由问题。李朝迁等人^[18]提出了一种新型模拟退火遗传算法求解了路径优化问题。Jamshidi R 等人^[19]采用了混合遗传田口算法,解决了供应链中经济、环境成本单目标分配问题。陈志强等人^[20]设计了遗传禁忌

混合算法,构建了全局时间成本最小及顾客满意度最高的多目标优化模型。张旭等人^[21]建立了混合鲁棒随机优化模型,基于蒙特卡罗采样的灾变自适应遗传算法检验了其有效性。薛婷^[22]针对管网流量分配优化子问题提出了基本环组合法,对于管网运行方案采用非序列动态规划方法求解。

综合运输路径优化研究现状,在天然气管道运输领域的研究相对较少。很少站在管网公司利润角度,构建数学模型。基于此,本文以管网公司输气利润最大为目标函数,在管网剩余能力不足下,研究如何代输托运商的天然气使得收益最大化。利用数学建模系统 MATLAB 编程求解并调用遗传算法,对比分析了不同管径、不同管输剩余能力、不同管输费的情景下的输气路径优化结果。

1 问题描述

天然气管输路径,由 2 个上载点、1 个下载点、6 个分输站、9 条管道和 4 座压气站组成,见图 1。上游 2 家托运商委托管网公司,分别从上载点 up1 和 up2 上载天然气输送到下载点 dp1。

1) 上载点 up1—下载点 dp1: 输气路径 a (cs1-L1-f1-L2-cs3-L3-f5)、输气路径 b (cs1-L1-f1-L4-cs4-L5-L6-f5) 和输气路径 c (cs1-L1-f1-L2-L8-L9-f5)。

2) 上载点 up2—下载点 dp1: 输气路径 d (f2-L7-L3-f5) 和输气路径 e (f2-L7-f3-cs2-L8-L9-f5)。

当管网中各条管道的剩余能力不能满足 2 家托运商的托运需求,则管网公司需要决策代输各家托运商的气量,以及各条输气路径中的流量,制定一套输气路径方案。

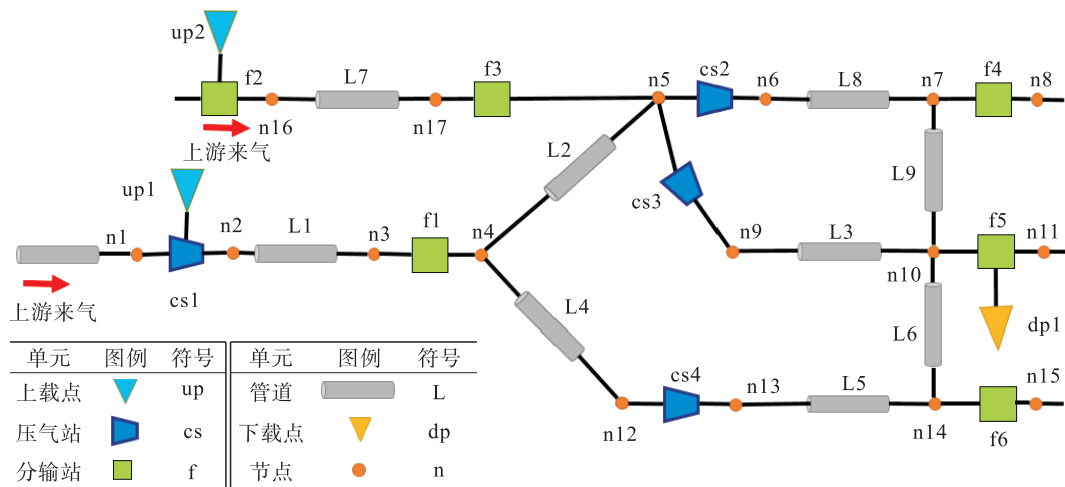


图 1 天然气管输路径示意图

Fig. 1 Natural gas pipeline path diagram

2 数学模型

2.1 目标函数

在管网中某几条管道的剩余能力不能满足所有托运商使用的情况下,管网公司通过合理规划分配托运商的天然气量到每条输气路径中,使得管网公司的效益最大化。目标函数见式(1)。

$$F_{\max} = F_1 - F_2 \quad (1)$$

式中: $F_{\max}$ 为代输托运商天然气的最大利润,万元/d; F_1 为天然气的管输收益,万元/d; F_2 为压气站能耗成本,万元/d。

2.1.1 管输收益

管输收益是指托运商通过管网公司将天然气由上游气源输送至城市门站收取的费用,见式(2)。

$$F_1 = \sum_i L_i Q_i o_i \quad (2)$$

式中: o_i 为第*i*条路径的管道运价率,元/($\text{km}^3 \cdot \text{km}$); Q_i 为第*i*条路径的分配流量, m^3/d ; L_i 为第*i*条路径的管道长度,km。

2.1.2 压缩机能耗成本

压缩机能耗成本与压气站输气量有关,所以优化变量为各站分配的天然气量,能耗成本公式见式(3)。

$$F_2 = \sum_j^{N_{\text{cs}}} C_j \delta_j t_j N_j \quad (3)$$

式中: N_{cs} 为压气站个数,个; N_j 为压缩机功率,kW; C_j 为与压缩机功率有关的费用系数,元/($\text{kW} \cdot \text{h}$); δ_j 为压缩机开机数量,个; t_j 为压缩机工作时间,h。

2.2 约束条件

2.2.1 容量约束

容量约束是指管网的站场不能超过其最大设计处理量,主要包括上载点、压气站、管道、分输站、下载点。

2.2.1.1 上载点容量约束

上载点的容量约束公式见式(4),确保上载气体量小于或等于上载点的分输站处理能力。

$$\sum_{\text{cs}} Q_{\text{cs},f} + \sum_{f'} Q_{f',f} + \sum_{\text{up}} Q_{\text{up},f} \leq Q_f^{\max} \quad (4)$$

式中: $Q_{\text{cs},f}$ 为压缩机站向分输站输送的流量, m^3/d ; $Q_{f',f}$ 为另一个分输站向该分输站输送的流量, m^3/d ; $Q_{\text{up},f}$ 为上载点向分输站的输气量, m^3/d ; $Q_f^{\max}$ 为分输站的最大处理能力, m^3/d 。

2.2.1.2 管道容量约束

管道容量约束公式见式(5),管道中流量与经过该管道的所有输气路径流量之和,要小于管道的最大容量。

$$Q_{\text{pipe}} + \sum_j Q_j \leq Q_{\text{pipe}}^{\max} \quad j \in N_{\text{route}} \quad (5)$$

式中: Q_{pipe} 为管道的流量, m^3/d ; $\sum_j Q_j$ 为经过该管道的所有输气路径*j*的流量之和, m^3/d ; $Q_{\text{pipe}}^{\max}$ 为管道的最大输

送能力, m^3/d ; N_{route} 为输气路径集合。

2.2.1.3 下载点剩余能力约束

下载点的剩余能力约束见式(6),确保下载量要小于分输站的剩余分输能力。

$$\sum_{\text{dp}} Q_{f,\text{dp}} \leq Q_f^b \quad (6)$$

式中: $Q_{f,\text{dp}}$ 为分输站下载气量, m^3/d ; Q_f^b 为下载点分输站的剩余分输能力, m^3/d 。

2.2.2 压缩机约束

压缩机约束主要是对设备工作范围和工作规则的约束,压缩机的工作情况还与流量、压头、压缩机效率等参数有关,因此也要对其相应参数进行约束。

2.2.2.1 压缩机功率

压缩机功率计算见式(7)。

$$N = \frac{MH_m}{\eta} \quad (7)$$

式中: N 为压缩机功率,kW; M 为压缩机质量流量,kg/s; H_m 为压缩机多变压头,J/kg; η 为压缩机效率。

2.2.2.2 压缩机压头曲线

压缩机压头计算见式(8)。

$$H = a_1 n^2 + b_1 n Q_{\text{cs}} + c_1 Q_{\text{cs}}^2 + \frac{d_1 Q_{\text{cs}}^3}{n} \quad (8)$$

式中: H 为压缩机压头,J/kg; a_1 、 b_1 、 c_1 、 d_1 为压缩机能头曲线拟合系数; n 为压缩机转速,r/min; Q_{cs} 为压缩机入口实际体积流量, m^3/min 。

2.2.2.3 压缩机效率曲线

压缩机效率计算见式(9)。

$$\eta = a_2 + b_2 n + c_2 n^2 + d_2 n^3 \quad (9)$$

式中: a_2 、 b_2 、 c_2 、 d_2 为压缩机功率曲线拟合系数。

2.2.2.4 压缩机喘振曲线

压缩机喘振流量计算见式(10)。

$$Q_{\text{cs}}^{\text{surge}} = a_3 + b_3 n + c_3 n^2 + d_3 n^3 \quad (10)$$

式中: $Q_{\text{cs}}^{\text{surge}}$ 为压缩机喘振流量, m^3/min ; a_3 、 b_3 、 c_3 、 d_3 为压缩机喘振曲线拟合系数。

2.2.2.5 压缩机滞止曲线

压缩机滞止流量计算见式(11)。

$$Q_{\text{cs}}^{\text{stonewall}} = a_4 + b_4 n + c_4 n^2 + d_4 n^3 \quad (11)$$

式中: $Q_{\text{cs}}^{\text{stonewall}}$ 为压缩机滞止流量, m^3/min ; a_4 、 b_4 、 c_4 、 d_4 为压缩机滞止曲线拟合系数。

2.2.2.6 压缩机温度约束

压缩机进、出口温度计算和温度约束计算见式(12)。

$$T_d = T_s \varepsilon^{\frac{m-1}{m}} < T_{\max} \quad (12)$$

式中: T_d 为压缩机出口温度,K; T_s 为压缩机进口温度,K; m 为压缩机多变指数; $T_{\max}$ 为最高出站温度,K。

2.2.2.7 压缩机压力约束

压缩机进、出口压力约束计算见式(13)~(14)。

$$P_{\min} \leq P_s \quad (13)$$

$$P_d \leq P_{\max} \quad (14)$$

式中: P_s 、 P_d 分别为压缩机进、出口压力, MPa; $P_{\min}$ 为压缩机最低进口压力, MPa; $P_{\max}$ 为管道最高进口压力, MPa。

2.2.3 管道约束

2.2.3.1 管道流量约束

管道质量流量公式见式(15)。

$$M = \frac{\pi}{4} \sqrt{\frac{[P_{\text{start}}^2(1 - c_1 h) - P_{\text{end}}^2] D^5}{\lambda Z R T_{\text{cp}} L \left(1 - \frac{c_1 \Delta h}{2}\right)}} \quad (15)$$

式中: P_{start} 为管道进口压力, MPa; P_{end} 为管道出口压力, MPa; T_{cp} 为平均温度, K; L 为管道长度, m; D 为管道内径, m; h 为进出口高程差, m; g 为重力加速度, 9.8 m/s^2 ; R 为气体常数, $8.314 \text{ J/(mol} \cdot \text{K)}$; λ 为摩擦系数, 其计算公式见式(16)。

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda}} = -2 \lg \left(\frac{\Delta}{3.7D} + \frac{2.51}{Re \sqrt{\lambda}} \right) \quad (16)$$

式中: Δ 为管道内壁的绝对粗糙度, m; Re 为雷诺数。

2.2.3.2 管道压力约束

管道压力约束计算见式(17)。

$$P \leq P_{\max} \quad (17)$$

式中: P 为管道内天然气压力, MPa。

2.2.4 节点流量平衡约束

节点流量平衡约束是指流入节点的流量等于流出节点的容量, 节点流量平衡约束计算见式(18)。

$$\sum_f Q_{f,cs} + \sum_{up} Q_{up,cs} = \sum_f Q_{cs,f} + \sum_r Q_{cs,r} \quad (18)$$

式中: $Q_{f,cs}$ 为分输站到压气站的流量, m^3/d ; $Q_{up,cs}$ 为上载点到压气站的流量, m^3/d ; $Q_{cs,f}$ 为压气站向分输站输送的流量, m^3/d ; $Q_{cs,r}$ 为压气站到用户的流量, m^3/d 。

3 求解方法

在建立好管输路径优化模型后, 选择数学建模系统

MATLAB 对模型进行求解。由于建立的模型属于多约束条件非线性优化问题, 因此, 在数学建模系统 MATLAB 中调用 linprog 和遗传算法进行求解。分别对管网流量和压力进行优化, 求解流程见图 2。

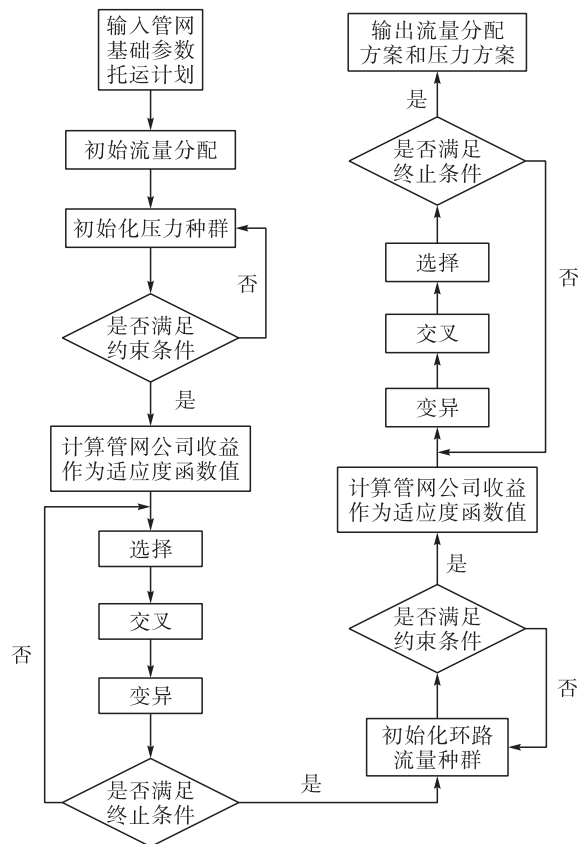


图2 求解流程图

Fig. 2 Solving flow chart

4 算例分析

4.1 基础数据

为了验证提出的输气路径数学模型, 采用含有 2 个基本环的天然气管网, 管网由 6 个压气站, 10 个分输站, 25 条管道组成, 见图 3。

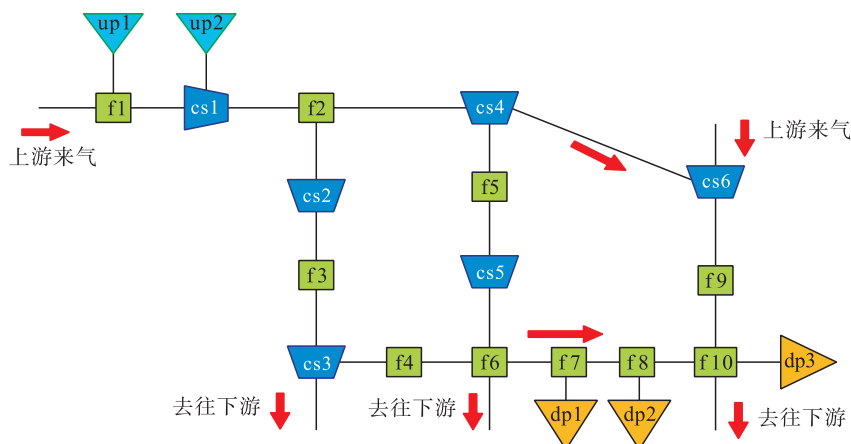


图3 天然气管网图

Fig. 3 Gas network diagram

单元	图例	符号
上载点		up
压气站		cs
分输站		f
下载点		dp
管道		L

甲托运商的 $500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 天然气与上游来气经过分输站 f1 增压后输送至下游分输站 f7 和 f10 分别下载 $300 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$; 乙托运商的 $500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 天然气在压气站 cs1 上载天然气, 输送至下游分输站 f8 和 f10 分别下载 $300 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 和 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。两个托运商的输气路径, 见表 1。

表 1 输气路径汇总表

Tab. 1 Summary table of gas transmission path

托运商	输气路径	路径组成
甲托运商	输气路径 A	f1-f2-cs3-f7
	输气路径 B	f1-f2-cs4-f6-f7
	输气路径 C	f1-f2-cs4-f6-f10
	输气路径 D	f1-f2-cs4-cs6-f10
乙托运商	输气路径 E	cs1-f2-cs3-f8
	输气路径 F	cs1-f2-cs4-f6-f8
	输气路径 G	cs1-f2-cs4-f6-f10
	输气路径 H	cs1-f2-cs4-cs6-f10

4.1.1 管道参数

相邻站场管道的长度和设计输送能力见表 2。管道的设计输送能力是根据压气站压缩机性能、压气站间距和管径计算得到。各管段的剩余能力以及管道流量压力见表 3, f1—f2 管段剩余能力为 $800 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 而代输全部天然气需要 $1\,000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 管网剩余能力不能满足需求。

表 2 管道基本参数

Tab. 2 Basic parameters of pipe

管道起点	管道终点	长度 / km	管径 / mm	输送能力 / ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
f1	cs1	70	1 219 × 22	8 000
cs1	f2	60	1 219 × 22	8 000
f2	cs2	100	1 016 × 18	4 100
cs2	f3	80	1 016 × 18	4 100
f3	cs3	80	1 016 × 18	4 100
cs3	f4	40	744 × 14	1 500
f4	f6	20	744 × 14	1 500
f2	cs4	90	1 016 × 18	4 100
cs4	f5	40	1 016 × 18	4 100
f5	cs5	120	1 016 × 18	4 100
cs5	f6	60	1 016 × 18	4 100
f6	f7	40	744 × 14	2 700
f7	f8	40	744 × 14	1 500
f8	f10	30	744 × 14	1 500
cs4	cs6	170	542 × 10	1 000
cs6	f9	80	1 016 × 18	4 100
f9	f10	60	1 016 × 18	4 100

表 3 管网运行参数表

Tab. 3 Pipe network operation parameters

管道起点	管道终点	管道输量 / ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	剩余能力 / ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	起点压力 / MPa	终点压力 / MPa
f1	cs1	7 200	800	7.50	6.61
cs1	f2	7 200	800	8.32	7.41
f2	cs2	3 500	600	7.41	6.50
cs2	f3	3 500	600	8.02	7.34
f3	cs3	3 450	650	7.34	6.50
cs3	f4	500	1 000	8.20	7.93
f4	f6	450	1 050	7.93	7.61
f2	cs4	3 700	500	7.41	6.50
cs4	f5	3 400	800	7.98	7.61
f5	cs5	3 400	800	7.61	6.50
cs5	f6	3 400	800	8.07	7.61
f6	f7	700	800	7.61	7.38
f7	f8	600	900	7.38	7.12
f8	f10	400	1 100	7.12	6.87
cs4	cs6	300	700	7.98	6.50
cs6	f9	3 100	1 000	8.32	7.41
f9	f10	3 000	1 100	7.41	6.87

4.1.2 压缩机参数

管网各压气站的压缩机参数见表 4, 电动机耗电单价为 0.429 83 元 / $\text{kW} \cdot \text{h}$, 管网中压气站 cs1 配有 4 台电驱压缩机和 1 台备用压缩机, 其他压气站配备了 2 台电驱压缩机和 1 台备用压缩机。

表 4 压缩机性能参数表

Tab. 4 Compressor performance parameters

压缩机数量	压缩机最大功率 / kW	最大压比	转速下限 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	转速上限 / ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	压缩机类型
4	9 800	1.4	4 200	9 000	电驱

4.1.3 站场参数

根据上游的气源出站压力、某些用户的最低天然气接收压力, 以管道现有设计输量计算压缩机额定功率下的站场压力和流量, 并考虑一定裕量, 得到目前站场的设计容量, 见表 5。

管网中有 10 个分输站, 每个分输站的分输能力以及代输第三方天然气前的实际分输量, 见表 6。

表 5 压气站和分输站设计容量表

Tab.5 Design capacity of compressor station and distribution station

站场	站场设计容量 / ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	站场	站场设计容量 / ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
cs1	8 000	f3	4 100
cs2	4 100	f4	2 000
cs3	4 100	f5	4 100
cs4	4 100	f6	4 100
cs5	4 100	f7	2 000
cs6	4 100	f8	2 000
f1	4 100	f9	4 100
f2	4 000	f10	4 100

表 6 分输站的设计最大分输量和实际分输量表

Tab.6 The maximum design throughput and actual throughput of the distribution station

站场	最大分输量 / ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	剩余分输量 / ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
f1	500	400
f2	500	400
f3	500	400
f4	500	400
f5	1 200	1 100
f6	500	400
f7	500	400
f8	500	400
f9	500	400
f10	1 200	1 100

4.2 优化结果分析

4.2.1 输气路径优化结果

以管输费用最大为目标函数,求解得到管网初始流量分配方案,管网中流量见表 7。

表 7 输气路径优化结果表

Tab.7 Gas transmission path optimization results

管道起点	管道终点	起点压力 /MPa		终点压力 /MPa		分配流量 / ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	优化后流量 / ($10^4 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
		优化前	优化后	优化前	优化后		
f1	cs1	7.50	7.50	6.61	6.53	800.00	8 000.00
cs1	f2	8.32	8.74	7.41	7.76	800.00	8 000.00
f2	cs2	7.41	7.76	6.50	6.79	387.50	3 887.50
cs2	f3	8.02	8.36	7.34	7.68	387.50	3 887.50
f3	cs3	7.34	7.68	6.50	6.81	387.50	3 837.50
cs3	f4	8.20	8.65	7.93	8.23	387.50	887.50
f4	f6	7.93	8.23	7.61	7.86	387.50	837.20
f2	cs4	7.41	7.76	6.50	6.87	412.50	4 112.50
cs4	f5	7.98	8.25	7.61	7.94	190.08	3 590.08
f5	cs5	7.61	7.94	6.50	6.92	190.08	3 590.08
cs5	f6	8.07	8.36	7.61	7.82	190.08	3 590.08
f6	f7	7.61	7.82	7.38	7.57	577.58	1 277.58
f7	f8	7.38	7.57	7.12	7.25	577.58	1 177.58
f8	f10	7.12	7.25	6.87	6.99	577.58	977.58
cs4	cs6	7.98	8.25	6.50	6.71	222.42	522.42
cs6	f9	8.32	8.43	7.41	7.49	222.42	3 322.42
f9	f10	7.41	7.42	6.87	6.83	222.42	3 122.42

从表 7 可知,输气路径优化后管网公司代输了甲托运商 $500 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的天然气,代输了乙托运商 $300 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的天然气。输气路径优化后管网水力模拟见

图 4,优化得到的节点压力参数和水力模拟得到的压力参数接近,说明优化计算较为准确。

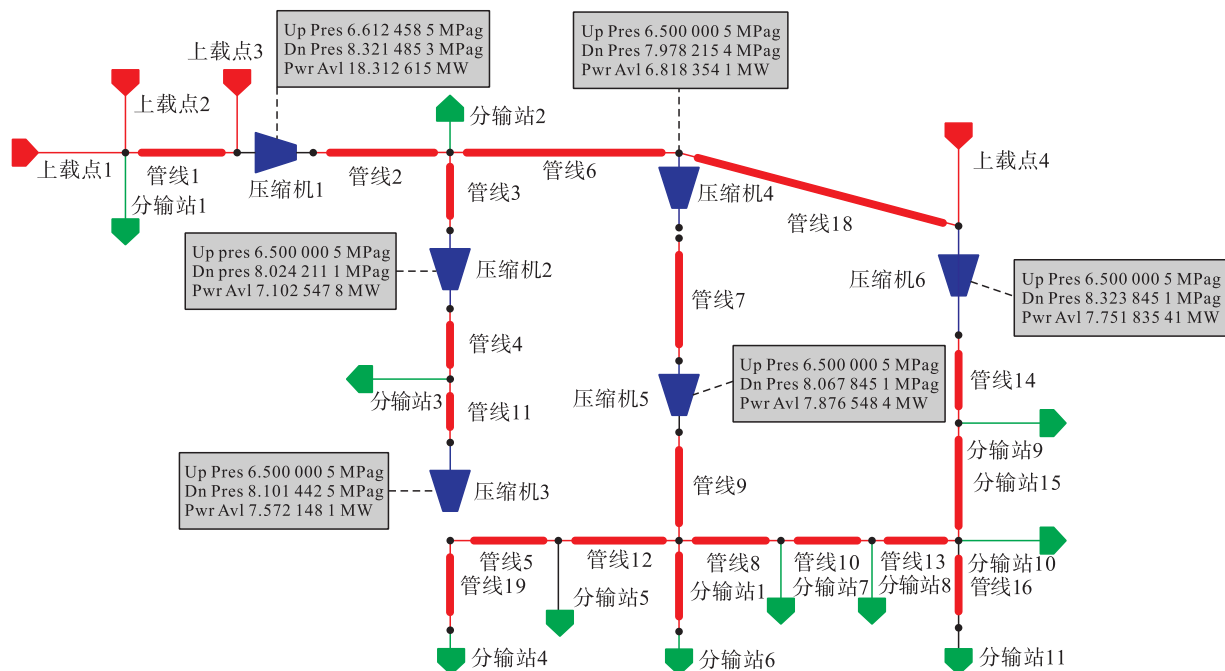


图 4 输气路径优化后管网水力模拟图

Fig. 4 Pipe network hydraulic simulation after gas transmission path optimization

4.2.2 管输利润分析

输气路径优化后各路径初始分配流量及管输费用见图 5,输气路径 A 初始分配流量为 $300 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,输气路径 B 初始分配流量为 0,输气路径 C 初始分配流量为 $98.79 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,输气路径 D 初始分配流量为 0。代输甲托运商的流量为 $101.21 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,管输费用为 62.97 万元/d。输气路径 E 初始分配流量为 $100 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,输气路径 F 初始分配流量为 0,输气路径 G 初始分配流量为 $98.79 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,输气路径 H 初始分配流量为 $101.21 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 。代输乙托运商的流量为 $300 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,管输费为 35.53 万元/d。

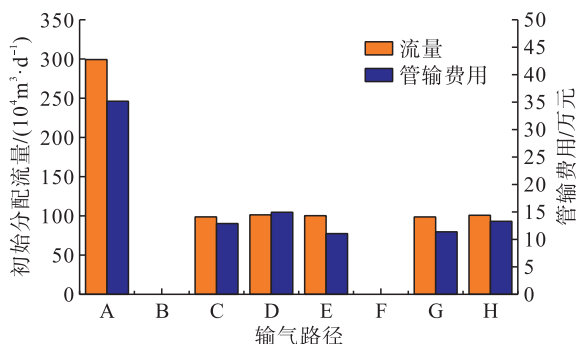


图 5 各路径初始分配流量及管输费用

Fig. 5 Initial flow allocation and pipeline transmission cost of each path

输气路径优化后各压缩机能耗见表 8。代输天然气前后压缩机能耗之差为 6.62 MW,能耗费用增加了 6.83 万元/d。

表 8 压缩机功率表

Tab. 8 Compressor power

压缩机编号	功率 /MW
cs1	21.48
cs2	7.89
cs3	7.27
cs4	7.47
cs5	7.52
cs6	8.41

迭代次数及收敛时间见图 6。采用初始流量法对管网进行流量分配后迭代求解到 53 次时求得最优解,收敛时间为 9.8 s,求解得到管道公司总利润为 91.46 万元/d。而未采用初始流量法迭代到 97 次求得局部最优解 90.26 万元/d。由此可见,采用初始流量法对代输流量进行初始分配,可以减少优化过程中搜索最优解步骤,使得优化时间大大缩短,且可以避免陷入局部最优解。

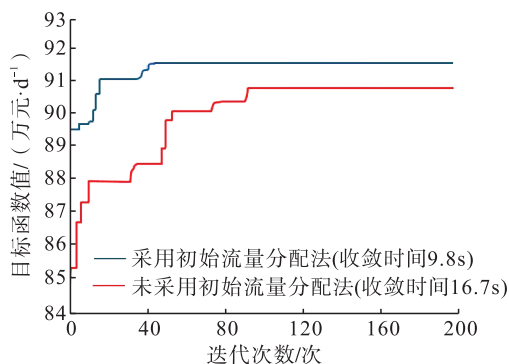


图 6 迭代收敛图

Fig. 6 Iterative convergence diagram

4.2.3 管道剩余能力影响分析

从上述分析可以看出,管段 f1—f5 至少需要提供 $1\,000 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的剩余能力,才能满足甲、乙托运商的托运计划。为了研究管道剩余能力不足对代输托运商天然气的影响规律,逐步降低管段 f1—f5 的剩余输送能力,分析 2 家托运商的各项输气路径输气量变化。

随着管段 f1—f5 剩余能力降低,各条输气路径的流量分配变化见图 7。当管段 f1—f5 剩余能力降低到 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 以下时,输气路径 F 分配流量为 $200 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,而其他输气路径流量为 0,即管网公司将管段 f1—f5 剩余能力分配给甲托运商的输气路径 F。输气路径 F 的长度为 530 km,平均运价率为 $0.147\,514 \text{ 元}/\text{m}^3$,其他输气路径平均运价率 $< 0.147\,514 \text{ 元}/\text{m}^3$ 。因此,在管网剩余能力不能满足所有托运商的托运计划时,将管道剩余能力分配给管输平均运价率高的输气路径,可以增加管道公司收益。

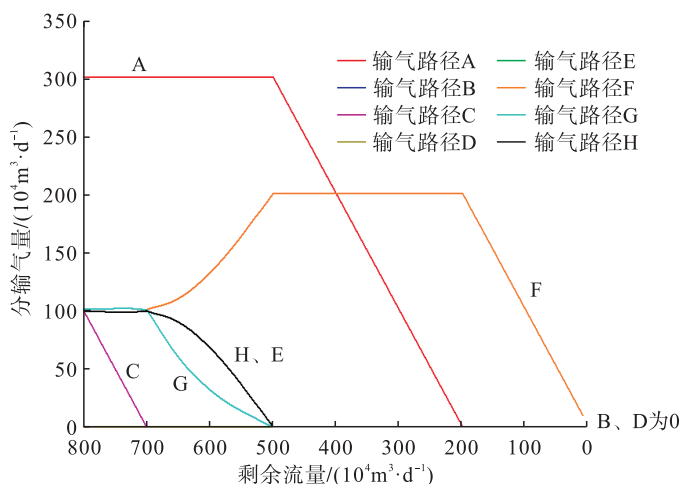


图 7 剩余能力对输气路径影响图

Fig. 7 Influence of residual capacity on gas transmission path

5 结论

本文建立了管道剩余能力不足下的数学模型,采用初始流量分配法对各条输气路径进行流量分配,在此基础上利用遗传算法对管网进行流量压力优化,得到最优输气路径方案。利用数学建模 MATLAB 软件优化每条路径的流量分配和站场能耗。结果表明,各条输气路径中的流量和各压气站能耗具有优化空间,能够增加管网公司收益。同时将管网公司利润最大化优化模型应用到天然气管网中,结果表明均适用,则该优化模型具有一定的推广性。

的环状天然气管网运行优化[J]. 天然气工业, 2020, 40 (2): 129-134.

YANG Yi, DIAO Hongtao, XIANG Min, et al. Operation optimization of a looped natural gas pipeline network based on dynamic programming and the golden section method [J]. Natural Gas Industry, 2020, 40 (2): 129-134.

[2] 昂 扬. 动态规划方法在天然气管网运行优化和控制中的应用研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2014.

ANG Yang. The application of research of dynamic programming method in natural gas transmission networks operation optimization and control [D]. Qingdao: China University of Petroleum (East China), 2014.

[3] 常海军, 戴征宇, 丁 媛. 输气管道的管存量优化控制[J]. 天然气工业, 2019, 39(3): 102-108.

CHANG Haijun, DAI Zhengyu, DING Yuan. Optimized control of line pack of gas pipeline [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39 (3): 102-108.

[4] 杨 毅, 李长俊. 优化算法在天然气管网运行中的应用[J]. 西南石油学院学报, 2006, 28(1): 79-82.

YANG Yi, LI Changjun. Application of algorithms in optimal operation of natural gas pipeline network [J]. Journal of Southwest Petroleum Institute, 2006, 28 (1): 79-82.

[5] HAMED M, FARAHANI R Z, HUSSEINI M M, et al. A distribution planning model for natural gas supply chain: A case study [J]. Energy Policy, 2009, 37 (3): 799-812.

[6] 朱金峰. 城市冷链物流车辆路径模型优化研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2009.

ZHU Jinfeng. Research on vehicle routing model optimization of urban cold chain logistics [D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2009.

[7] KOVACS A A, PARRAGH S N, HARTL R F. The multi-objective generalized consistent vehicle routing problem [J]. European Journal of Operational Research, 2015, 247 (2): 441-458.

[8] 曾叶丽, 董秀成. 基于供应链理论构建天然气市场结构优化模型[J]. 天然气工业, 2006, 26(12): 165-167.

ZENG Yeli, DONG Xiucheng. To build up an optimization model of natural gas market based on the theory of supply chain [J]. Natural Gas Industry, 2006, 26 (12): 165-167.

[9] CHIANG W C, RUSSEL R A. Integrating purchasing and routing in a propane gas supply chain [J]. European Journal of Operation Research, 2004, 154 (3): 710-729.

[10] 单保华, 唐丽敏, 朱明明. 应对内陆城市天然气调峰的 LNG 罐箱运输路径优化[J]. 中国水运, 2020, 20 (11): 37-39.

SHAN Baohua, TANG Limin, ZHU Mingming. Optimization of LNG tank transportation route for natural gas peak shaving in inland cities [J]. China Water Transport, 2020, 20

参考文献:

[1] 杨 毅, 刁洪涛, 向 敏, 等. 基于动态规划和黄金分割法

(11): 37-39.

- [11] 崔岩, 张子祥, 时新, 等. 考虑顾客时间紧迫度的生鲜电商配送路径优化问题[J]. 郑州大学学报(工学版), 2017, 38(6): 59-63.
CUI Yan, ZHANG Zixiang, SHI Xin, et al. Fresh agricultural product E-commerce distribution routing problem considering time demand of customer [J]. Journal of Zhengzhou University (Engineering Science), 2017, 38(6): 59-63.
- [12] 吴岩, 宫敬. 智能控制方法在天然气管道中的应用研究[J]. 油气储运, 2006, 25(8): 29-32.
WU Yan, GONG Jing. The application of intelligent control technique in natural gas pipeline [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2006, 25(8): 29-32.
- [13] 蒋毅, 陈次昌, 陈芬. 改进遗传算法在输气管道运行优化中的应用[J]. 油气储运, 2009, 28(7): 32-35.
JIANG Yi, CHEN Cichang, CHEN Fen. Application of improved genetic algorithm in optimal operation of long-distance natural gas pipelines [J]. Oil & Gas Storage and Transportation, 2009, 28(7): 32-35.
- [14] 于进, 郝小虎, 刘四洋, 等. 基于两种算法的天然气管网运行优化技术[J]. 实验室研究与探索, 2014, 33(10): 27-31.
YU Jin, HAO Xiaohu, LIU Siyang, et al. The research on running optimization technology of natural gas pipelines based on two algorithms [J]. Research and Exploration in Laboratory, 2014, 33(10): 27-31.
- [15] WANG Bohong, YUAN Meng, ZHANG Haoran, et al. An MILP model for optimal design of multi-period natural gas transmission network [J]. Chemical Engineering Research and Design, 2018, 129: 122-131.
- [16] 徐慧, 王诗鹏, 何光渝. 遗传算法优化天然气管网输配运行方案[J]. 石油工业技术监督, 2005, 21(5): 52-54.
XU Hui, WANG Shipeng, HE Guangyu. Operation scheme for optimizing gas pipeline transmission and distribution by genetic algorithm [J]. Technology Supervision in Petroleum Industry, 2005, 21(5): 52-54.
- [17] GHAMI Y, DEMIR E, WOENSEL T V, et al. A deteriorating inventory routing problem for an inland liquefied natural gas distribution network [J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2019, 126: 45-67.
- [18] 李朝迁, 裴建朝. 新型模拟退火遗传算法在路径优化的应用[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(3): 52-55.
LI Chaoqian, PEI Jianchao. Application of new simulated annealing genetic algorithm in path optimization [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2022(3): 52-55.
- [19] JAMSHIDI R, GHOMI S F, KARIMI B. Multi-objective green supply chain optimization with a new hybrid memetic algorithm using the Taguchi method [J]. Scientia Iranica, 2012, 19(6): 1876-1886.
- [20] 陈志强, 吴芳. 基于遗传禁忌混合算法的软时间窗无人配送车路径优化[J]. 兰州交通大学学报, 2021, 40(6): 43-48.
CHEN Zhiqiang, WU Fang. Path optimization of unmanned delivery vehicles with soft time windows based on genetic and Tabu hybrid algorithm [J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2021, 40(6): 43-48.
- [21] 张旭, 袁旭梅, 降亚迪. 需求与碳交易价格不确定下多式联运路径优化[J]. 系统工程理论与实践, 2021, 41(10): 2609-2620.
ZHANG Xu, YUAN Xumei, JIANG Yadi. Optimization of multimodal transportation under uncertain demand and stochastic carbon trading price [J]. Systems Engineering-Theory & Practice, 2021, 41(10): 2609-2620.
- [22] 薛婷. 含环路输气管网运行方案优化研究[D]. 北京: 中国石油大学, 2016.
XUE Ting. Optimized operation of a gas pipeline network with circuits [D]. Beijing: China University of Petroleum, 2016.